

Gravimetria

- na Prif UK v rámci magisterského študijného programu „Aplikovaná a environmentálna geofyzika“ sú v prípade gravimetrie **2 nosné predmety**:

Gravimetria (1) (Pašteka), 1. roč., ZS, povinný predmet, 3/1
základné metodické poznatky (spracovanie, interpretácia)

Gravimetria (2) (Bielik), 1. roč, LS, povinný predmet, 2/0
interpretácia + aplikačné oblasti, najmä v geológii

plus niekoľko ďalších výberových predmetov...

Gravimetria (1)

- stručná náplň predmetu:

- Zem ako teleso (tvar Zeme), trošku z fyzikálnej geodézie, normálne tiažové pole
spracovanie gravimetrických údajov do formy ÚBA (definícia a výpočet úplnej Bouguerovej anomálie, výpočet topokorekcií),
- základy teórie potenciálu, priama úloha gravimetrie (výpočet gravitačných účinkov jednoduchých a zložitejších telies),
- základy interpretácie gravimetrických údajov, obrátená úloha gravimetrie, modelovanie, transformácie poľa ÚBA,

Gravimetria (1)

- hodnotenie predmetu (4 kredity):
 - vypracovanie cvičení* (15 %)
 - priebežné písomky (3 sa semester) (25 %)
 - ústna skúška (60 %)

*vypracované cvičenia je potrebné odovzdať do 2 týždňov od dátumu (a hodiny) zadania

e-mailová adresa: roman.pasteka@uniba.sk

(každý deň omeškania znižuje hodnotenie vypracovaného cvičenia o jeden stupeň)

program prednášok **Gravimetria (1)**

- úvod, repetitóriium doterajších poznatkov
- tvar Zeme, normálne pole
- korekcie v gravimetrii, topokorekcie
- definícia a výpočet ÚBA
- priama úloha pre jednoduché telesá
- modelovanie účinkov zložitejších telies
- teória obrátenej úlohy
- interpretačné metódy
- transformácie potenciálových polí
- doplňujúce témy (slapy, izostázia, aplikácie)

program cvičení Gravimetria (1)

- spracovanie chodu gravimetra
- výpočet normálneho poľa
- význam Bullardovho člena
- praktický výpočet terénnych korekcií
- výpočet ÚBA
- analýza ÚBA vybraných území SR
- priama úloha pre jednoduché telesá (2D a 3D)
- použitie jednoduchých interpretačných metód
(metóda polovičnej šírky anomálie)
- jednoduchý príklad modelovania (dutiny)
- zložitejší príklad modelovania (geologické telesá)
- použitie transformovaných polí v interpretácii

Gravimetria – základné pojmy

- gravimetria: gravis (ťažký) + metrein (merať)
- historický vývoj:
 - od (Aristotela) Gallilea,
 - cez Newtona ku Poissonovi a Bouguerovi
 - (ďalej Richer, Huygens, Clairaut, Laplace, Stokes, Green, Helmert, Bullard,...)



Galileo Galilei
(1564 - 1642)



Isaac Newton
(1643 - 1727)



Pierre Simon Laplace
(1749 – 1827)



Pierre Bouguer
(1698 – 1758)

Gravimetria – základné pojmy

- Jean Richer (1630-1696) zistil z kyvadlových meraní rozdiely medzi zrýchlením v Paríži a Cayenne, čo interpretoval tvarom Zeme – jej sploštením (oblate spheroid), podobne tak učinil aj I. Newton,
- merania dĺžky šírkového stupňa vo Francúzsku v rokoch 1669 a 1718 však naznačovali na opačné sploštenie (prolate spheroid),
- bolo potrebné túto dôležitú vec „rozlúsknuť“

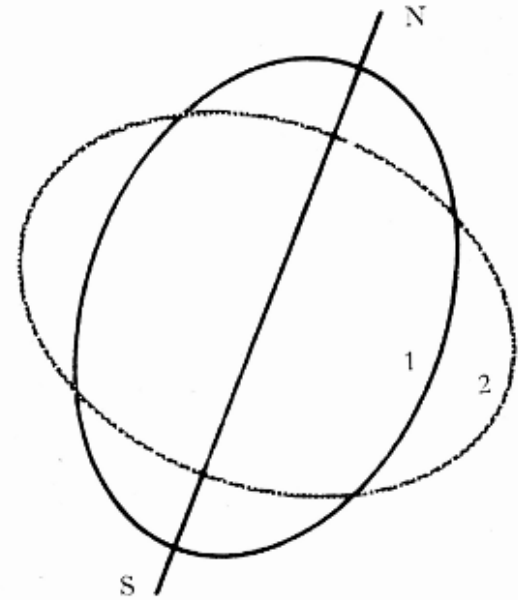


Figure 3.—MEASUREMENTS OF THE LENGTH of a degree of latitude which were completed in different parts of France in 1669 and 1718 gave differing results which suggested that the shape of the earth is not a sphere but a prolate spheroid (1). But Richer's pendulum observation of 1672, as explained by Huygens and Newton, indicated that its shape is that of an oblate spheroid (2). The disagreement is reflected in this drawing. In the 1730's it was resolved in favor of the latter view by two French geodetic expeditions for the measurement of degrees of latitude in the equatorial and polar regions (Ecuador—then part of Peru—and Lapland).

Gravimetria – základné pojmy

- historický vývoj: Pierre Bouguer (1698 - 1758)

mimoriadne zaujímavá postava,

účastník dôležitej expedície do Ekvádoru (1735-1745)

spolu s La Condamine, Godin a Jussieu

(v prípade záujmu poskytnem film:

Voyages of Discovery: Figure of the Earth)

druhá výprava – do Laponska (1736) - A. Celsius a

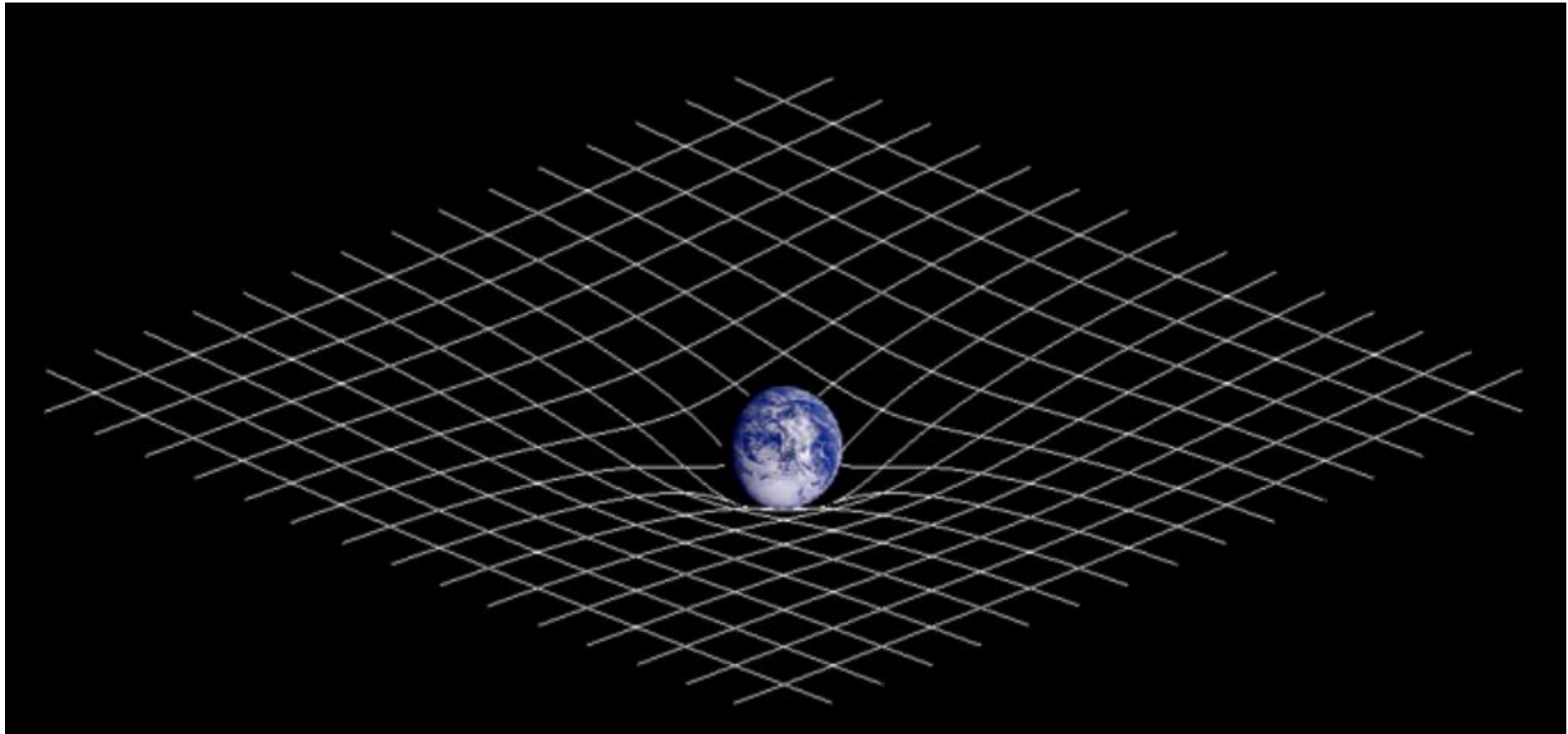
P. Maupertuis)



Gravimetria – základné pojmy

- úplne iný pohľad na gravitáciu (nie ako silové pôsobenie, ale ako vlastnosť časopriestoru) –

Einsteinova všeobecná teória relativity



Celkom zaujímavé video:

<https://www.youtube.com/watch?v=MTY1Kje0yLg&t=408s>

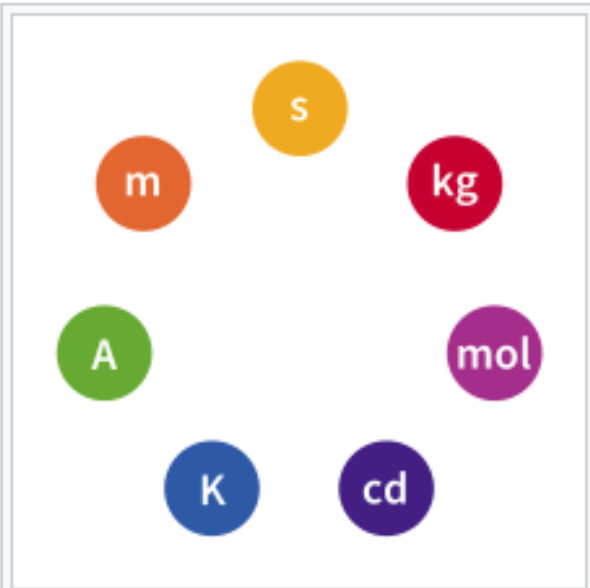
Gravimetria – základné pojmy

- **problémy s prototypom kilogramu**
(1889, uložený v BIPM v Sévres pri Paríži)
(odvtedy vybraný iba v 1946 a 1989)
(zliatina platiny [90%] a irídia [10%])
(vyrobených 40 kópií – po celom svete)



Za 100 rokov stratil tento prototyp pri porovnaní s inými kópiami hmotnosť cca 100 μg (!).

- strata atómov vodíka (?)
- ošúchanie povrchu pri manipulácii (?)
- “nalepenie molekúl vzduchu na iné kópie” (?)
- v podstate to fyzici nevedia vysvetliť...



Sedem základných jednotiek SI

Symbol	Názov	Veličina
K	kelvin	termodynamická teplota
s	sekunda	čas
m	meter	dĺžka
kg	kilogram	hmotnosť
cd	kandela	svietivosť
mol	mól	látkové množstvo
A	ampér	elektrický prúd

Dňa 16. novembra 2018 zasadala "Generálna konferencia pre váhy a miery" a prijala nové definície základných jednotiek SI.

Tieto sú platné od dňa 5. mája 2019, dňa 144. výročia zavedenia metrického systému. Hlavné zmeny sa týkali definícií 4 z nich: kg, A, mol a K.

Súčasná koncepcia sa snaží prepojiť tieto definície na základné fyzikálne konštanty, ktoré vieme merať s relatívne vysokou presnosťou (v rozdielnych laboratóriách po celej Zemi).

Základné jednotky SI		
Meno	Symbol	Veličina
meter	m	dĺžka
kilogram	kg	hmotnosť
sekunda	s	čas
ampér	A	elektrický prúd
kelvin	K	termodynamická teplota
mól	mol	látkové množstvo
kandela	cd	svietivosť

Kilogram je definovaný pri zachovaní stálej numerickej hodnoty Planckovej konštanty h pri $6.62607015 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$).

Jednotka $\text{J}\cdot\text{s}$ opisuje sumáciu energie v určitom systéme v čase. Meria sa pomocou Kibblových (wattových) váh, kde sa tiažová sila telesa porovnáva pomocou rovnoramennej páky s magnetickou silou pôsobiacou na cievku s určitým elektrickým prúdom.

Historické definície:

Kilogram sa rovná hmotnosti medzinárodného prototypu kilogramu (platino - irídiový valec), ktorý je umiestnený v Medzinárodnom úrade pre miery a váhy v Paríži.

Ešte staršia definícia:

Kilogram sa rovná hmotnosti 1 litra vody pri teplote topiaceho sa ľadu. Liter je tisícina kubického metra.

Gravimetria – základné pojmy

- **meraná veličina**: tiažové zrýchlenie (g , V_z)
(v ostatných rokoch sa merajú aj jeho zmeny – vyššie gradienty)
- aký je rozdiel medzi **gravitačným a tiažovým** zrýchlením? (alebo ide o synonymá?)
- tiažové zrýchlenie je **vektorová veličina**, avšak pre mnohé účely ho berieme ako **skalár**: $|\vec{g}| = g$
- tiažový potenciál nevieme merať, iba ho rekonštruovať,
- smer vektora tiažového zrýchlenia je takmer identický s vertikálou (odklon sa volá zvislicová odchýlka – je veľmi malá), takže často sa uvažuje: $g \approx V_z$

Gravimetria – základné pojmy

Tiažové a gravitačné polia sú:

konzervatívne (práca, vykonaná po uzavretej dráhe je nulová)

potenciálové – je možné ho vyjadriť

ako gradient potenciálu: $\vec{g} = \text{grad}(V)$

harmonické – platí preň mimo zdrojov

Laplaceova rovnica: $\nabla^2 V = 0$

(v rámci zdrojov platí Poissonova rovnica $\nabla^2 V = -4\pi\sigma$).

Vyššie derivácie tiažového (gravitačného)

potenciálu V : $V_z = \partial V / \partial z$, $V_{xz} = \partial^2 V / \partial x \partial z$, $V_{zz} = \partial^2 V / \partial z^2$

Gravimetria – základné jednotky

zrýchlenie:

system SI: $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$

používané sú násobky: $1 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-2} = 10^{-6} \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$

V anglosaskej literatúre (starý systém CGS) mGal, mgl:

Gal bol definovaný ako 1 centimeter za sekundu na druhú = $1 \text{cm}/\text{s}^2$.

$$1 \text{ Gal} = 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$

$$1 \text{ mGal} = 10 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$$

$$1 \text{ mGal} = 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$

$$1 \text{ Gal} = 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$

$$1 \mu\text{Gal} = 0.001 \text{ mGal}$$

gradient zrýchlenia:

s^{-2} , mGal/m, $\mu\text{Gal}/\text{m}$

$$1 \text{ E} = 10^{-9} \text{ s}^{-2} = 1 \text{ mGal}/10 \text{ km}$$

Gravimetria – základné pojmy

- meranie tiažového zrýchlenia:
 - H. Cavendisch (1797), torzné váhy, (grav. konštanta)
 - kyvadlové prístroje: od F. Bacona (1620)
až po Bullarda (1936), v podstate až po súčasnosť
 - paralelne s tým torzné váhy na zisťovanie
niektorých vyšších gradientov V (tzv. Eötvösove váhy)
 - v 1930-1940 nástup pružinových gravimetrov
(používaných dodnes; Scintrex CG-3, CG-5, CG-6, ZLS-Burris)
 - od cca 1960 rokov vývoj absolútnych gravimetrov
na báze voľného pádu (JILAG, FG-5, A-10)
 - adaptácia pružinových prístrojov na lode a lietadlá
 - vývoj systémov na meranie FTG - gradiometre

Gravimetria – základné pojmy

- meranie tiažového zrýchlenia:

súčasnú modernú (state of the art) absolútne gravimetrie



Micro-g FG-5
(laboratórny prístroj)



Micro-g A-10
(terénny prístroj)

Gravimetria – základné pojmy

- meranie tiažového zrýchlenia:

súčasnú modernú (state of the art) relatívne gravimetrie



**LaCoste and
Romberg
(LC&R),
modely G a D**



**Scintrex
CG-3 a
CG-3M**



**Scintrex
CG-5**

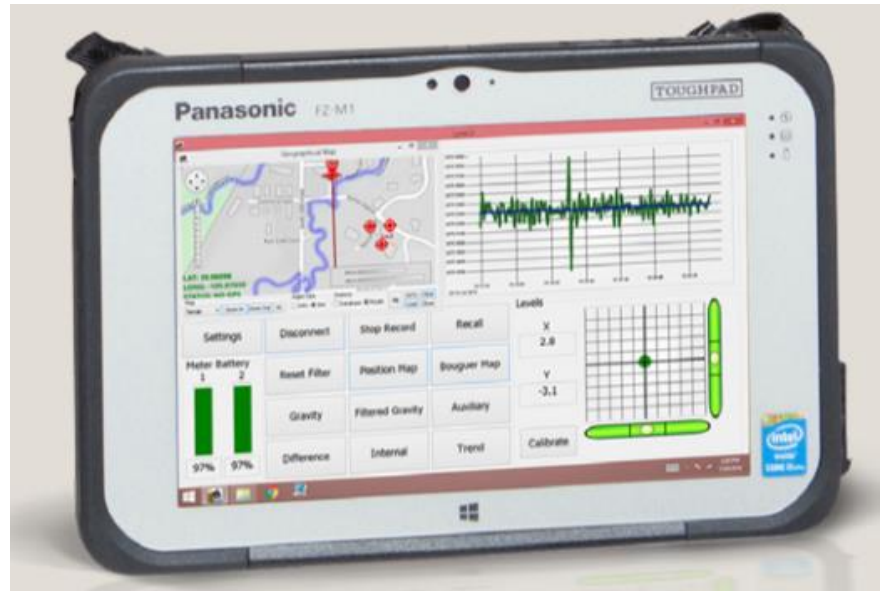


**ZLS-Burriss
(skratka pre
Zero Length
Spring)**

Gravimetria – základné pojmy

- meranie tiažového zrýchlenia:

súčasnú modernú (state of the art) relatívne gravimetrie



Scintrex CG-6

Gravimetria – základné pojmy

- meranie tiažového zrýchlenia:

súčasnú modernú (state of the art) relatívne gravimetrie



LG-1 LAND GRAVITY METER



LG-1 CONTROL UNIT

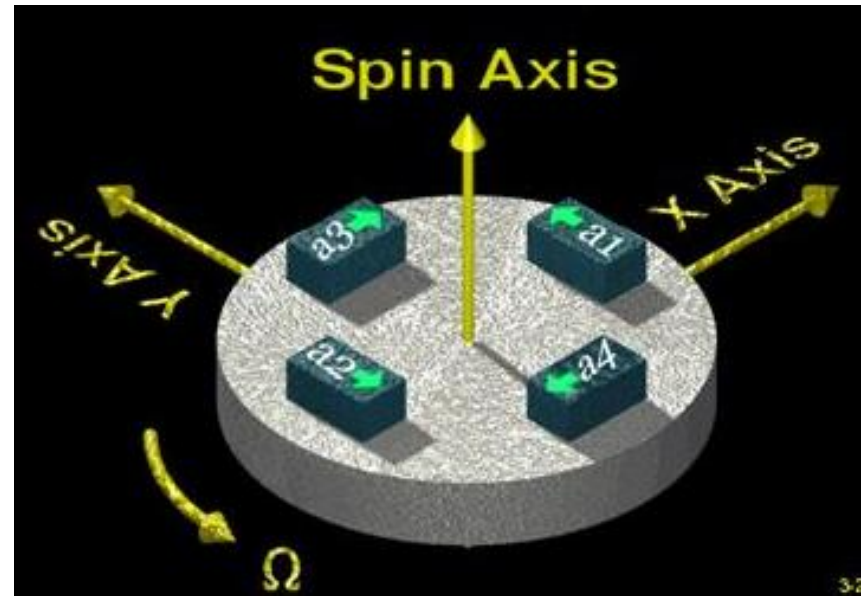


GF Instruments (Brno), LG-1 Galileo

Gravimetria – základné pojmy

- meranie vyšších gradientov tiažového zrýchlenia (FTG – Full Tensor Gradient):

najmodernejšie prístroje (prístupy): gradiometre



rotujúci disk so štyrmi akcelerometrami (piezoelektrický jav)

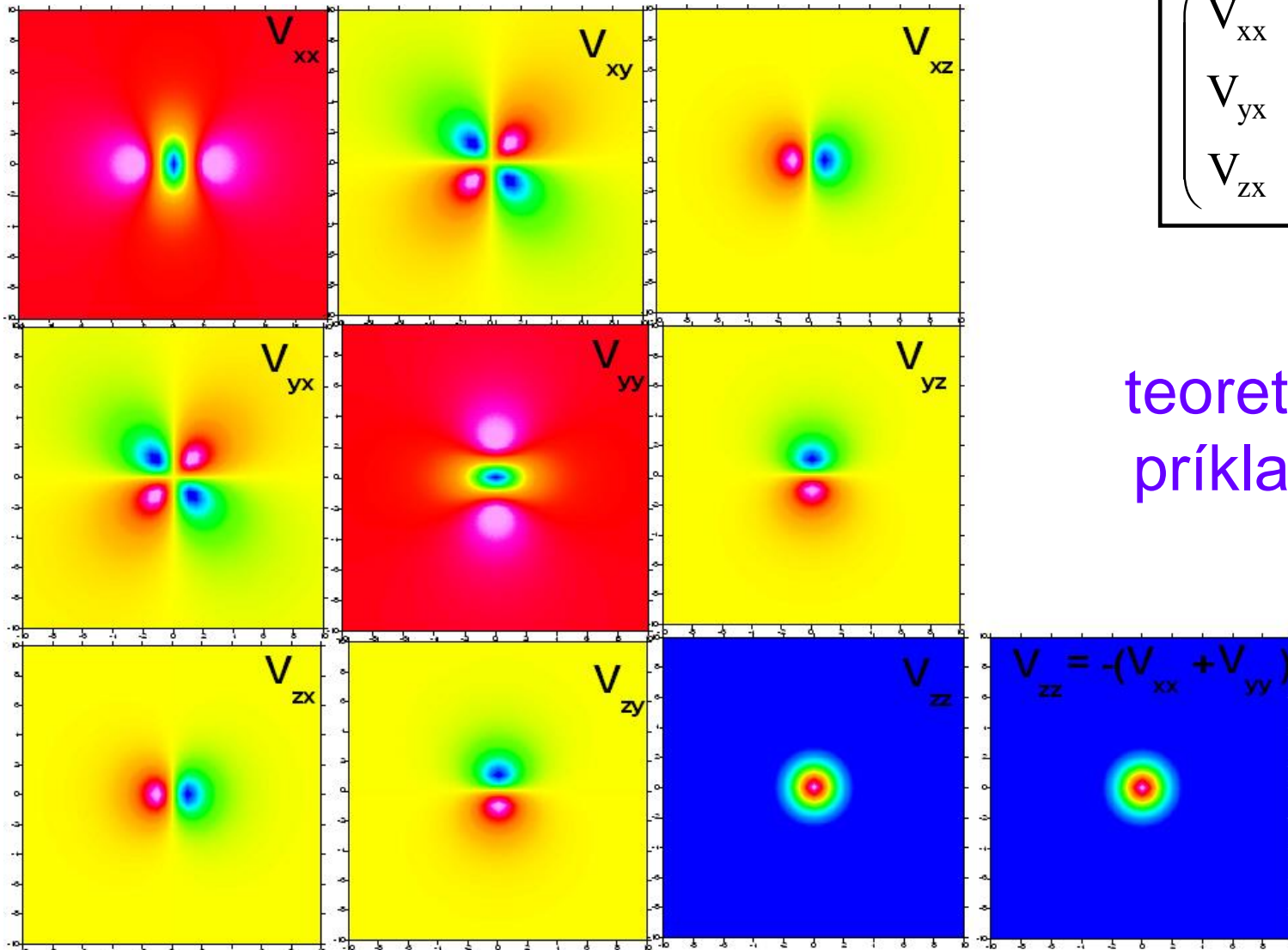
zatiaľ používané len na lodiach, lietadlách a družiciach (GOCE)

- meranie vyšších gradientov tiažového zrýchlenia:

5 nezávislých zložiek

$$\begin{pmatrix} V_{xx} & V_{xy} & V_{xz} \\ V_{yx} & V_{yy} & V_{yz} \\ V_{zx} & V_{zy} & V_{zz} \end{pmatrix}$$

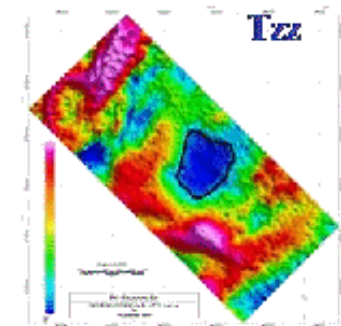
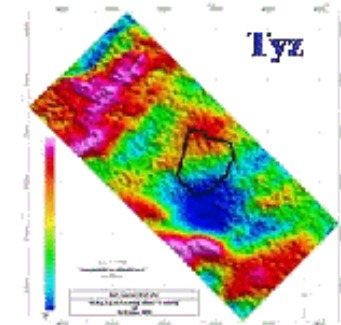
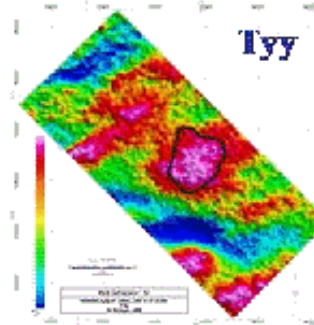
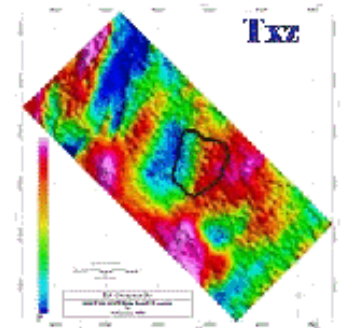
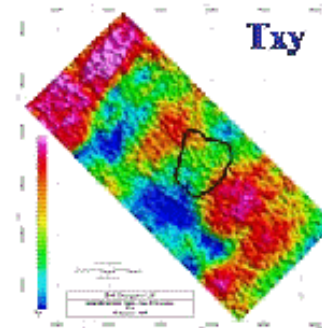
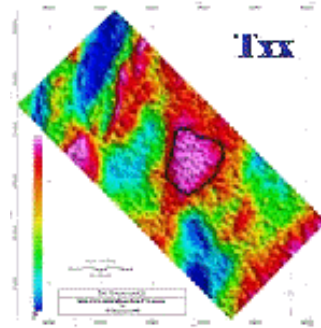
teoretický
príklad: guľa



- meranie vyšších gradientov tiažového zrýchlenia:

praktický príklad:
solný peň

(zdroj: Bell-Geospace)



V_{zz} lokalizuje stred objektu,

V_{xx} a V_{yy} identifikujú S-J a V-Z
okraje štruktúr,

V_{xz} a V_{yz} identifikujú hlavné osi
(tektonika),

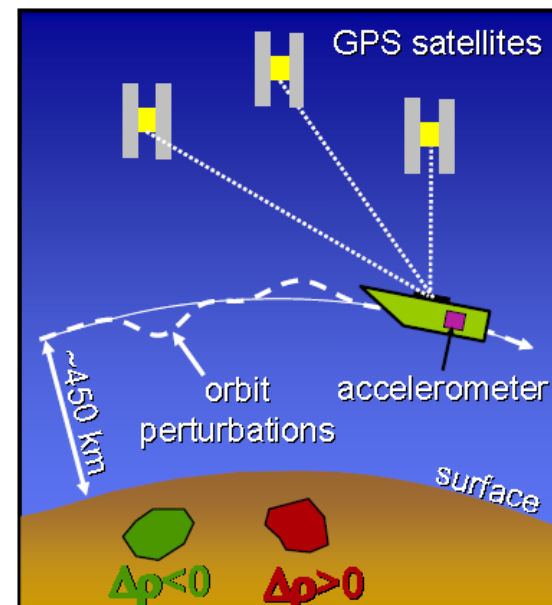
V_{xy} poukazujú na rohy
anomálnych štruktúr,

staršie satelitné systémy:
GRACE a CHAMP

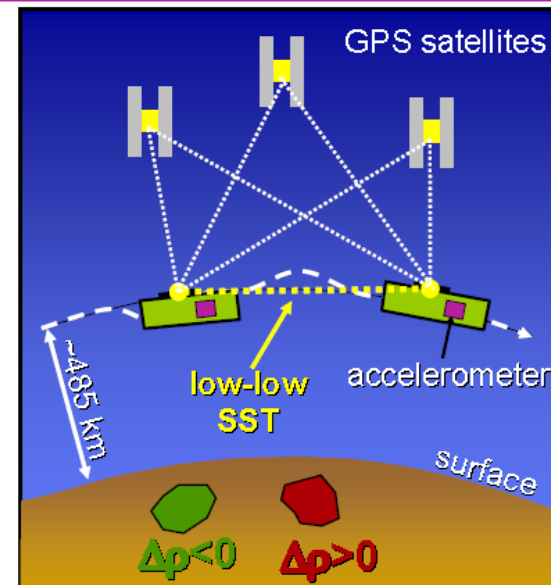
nový systém: GOCE



- Launched 2000.
- Single satellite.
- High-low SST.
- Polar gap $\sim 3^\circ$.
- Instruments:
 - vector and scalar magnetometers,
 - accelerometer,
 - star cameras,
 - GPS.



- Launched 2002.
- Two-satellites.
- High-low-SST & low-low-SST.
- Polar gap $\sim 1^\circ$.
- Time-varying gravity field.
- Instruments:
 - accelerometer,
 - star cameras,
 - GPS.



SST: Satellite-to-Satellite Tracking

nový systém: GOCE

štart: 17. marec 2009

koniec: 11. november 2013

výška preletu nad
povrchom Zeme: 260 km



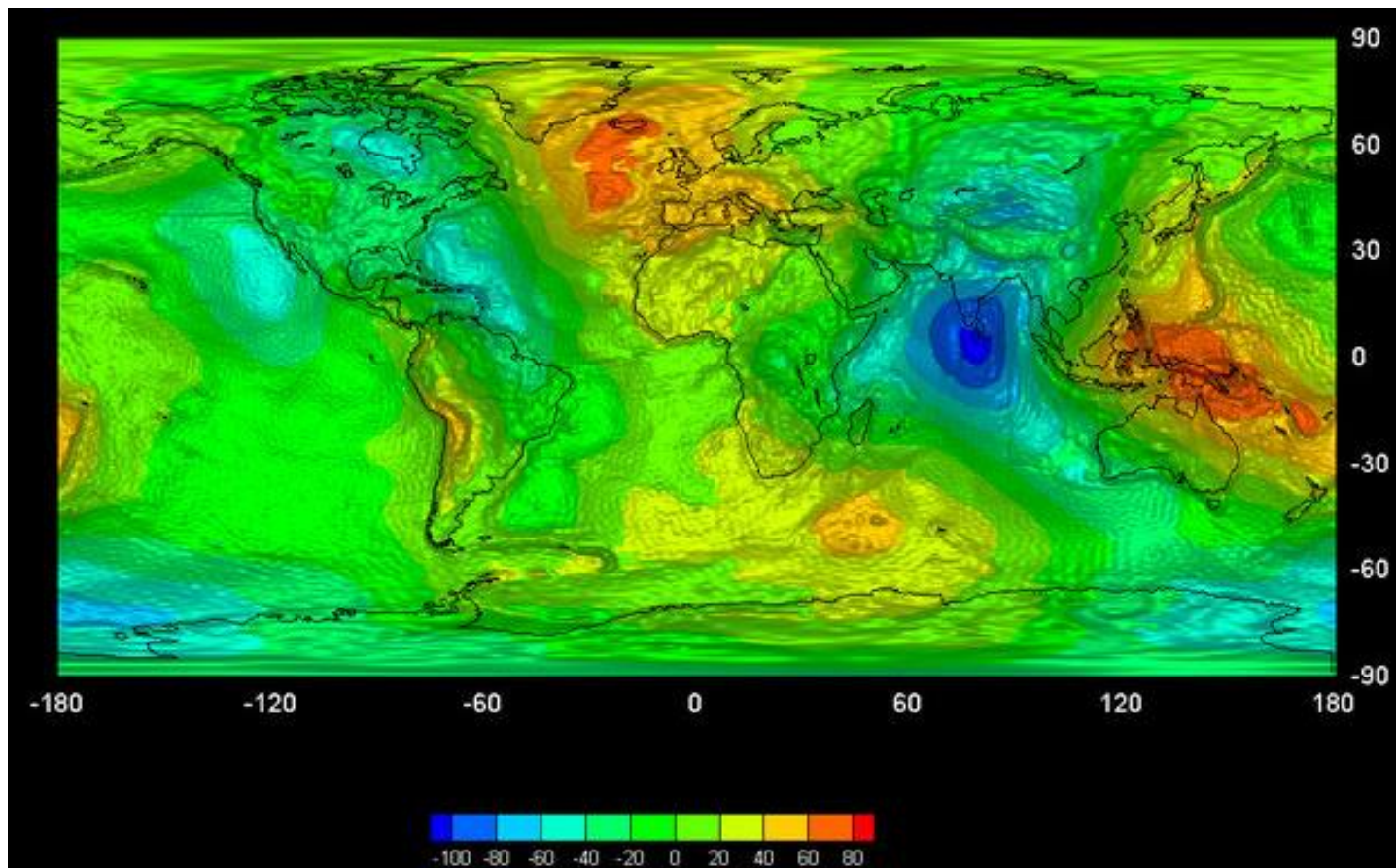
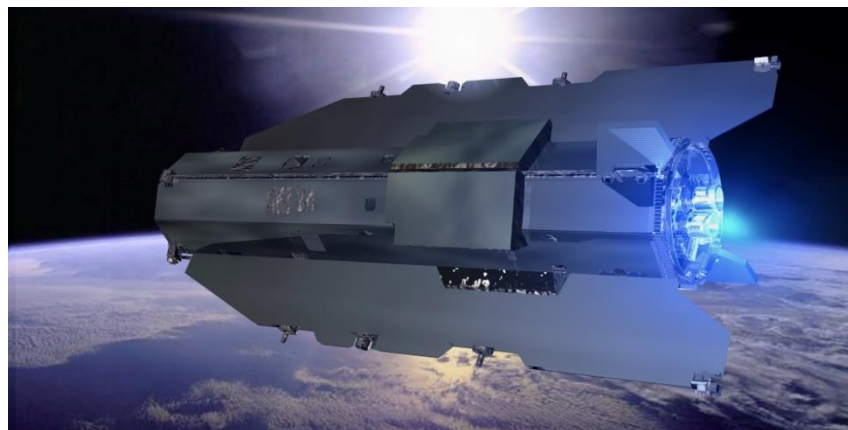
GOCE re-enters Earth's atmosphere

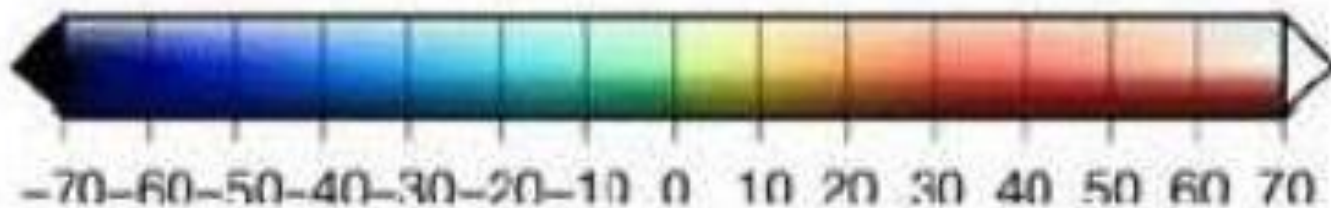
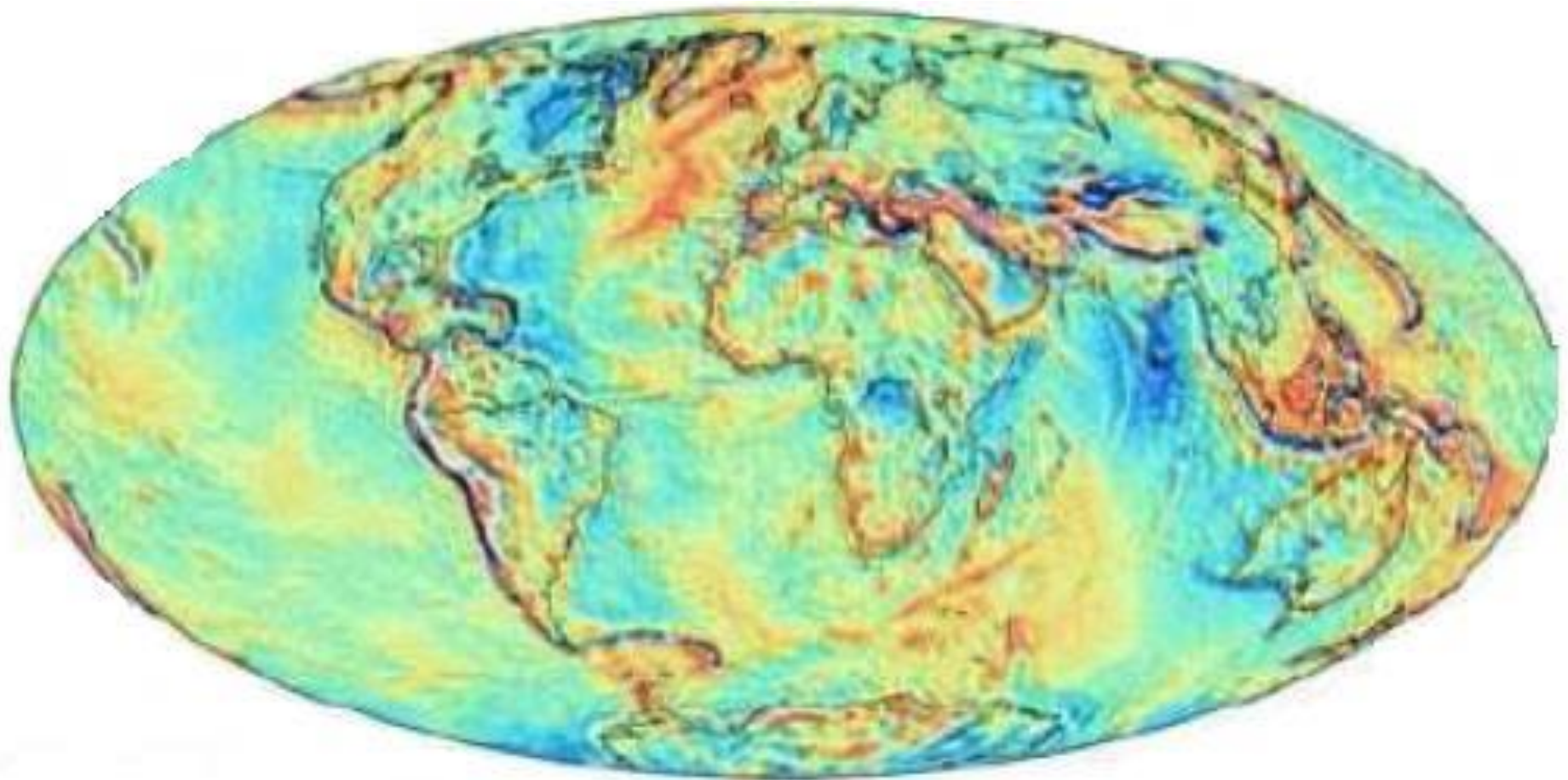
nový systém: GOCE

štart: 17. marec 2009

koniec: 11. november 2013

výška preletu nad
povrchom Zeme: 260 km





anomálie tiažového poľa Zeme (zo satelitných meraní, GRACE)

Gravimetria – poznámky ku prvotnému spracovaniu

Prvotné spracovanie gravimetrických meraní:

- oprava o chod gravimetra a
- prepočet na absolútnu hodnotu
(nerobí sa často v prípade mikrogravimetrie)

Vo väčšine algoritmov je chod gravimetra aproximovaný pomocou:

- a) polynómom nižšieho stupňa alebo
- b) splajnových funkcií.

Táto aproximujúca funkcia je potom odrátaná od všetkých meraných hodnôt.

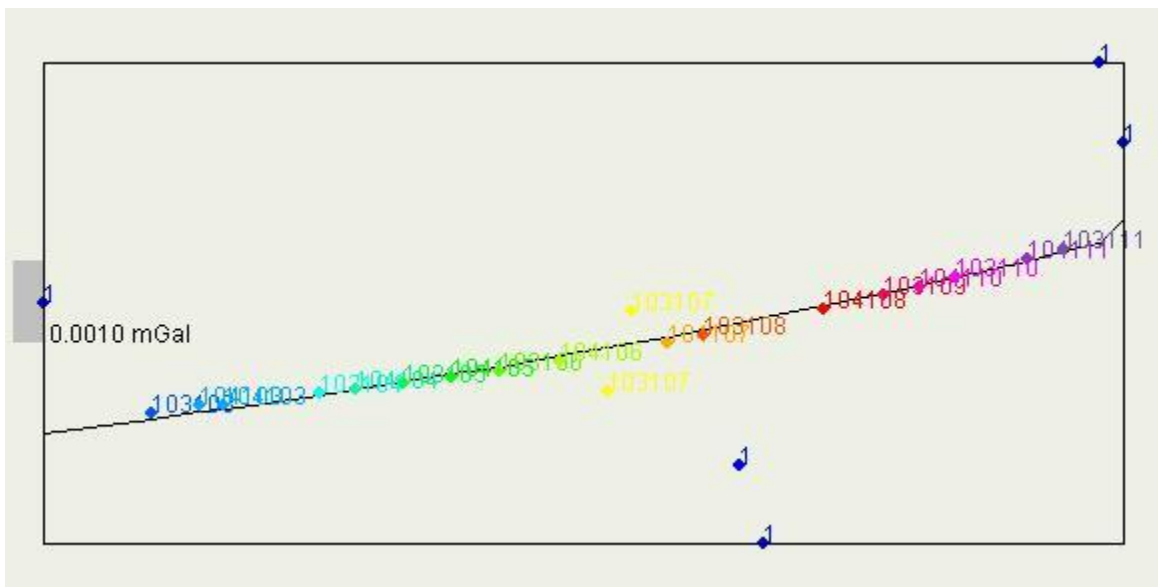
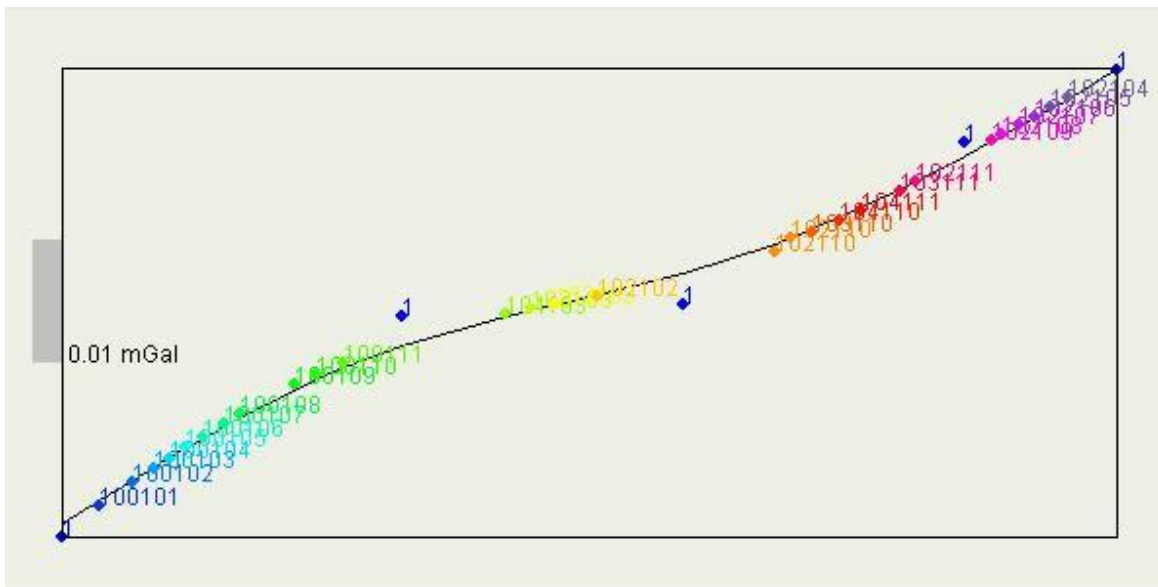
Základná kontrola správnosti opravy o chod je skutočnosť, že hodnoty na základnom bode (ZB) sú rovnaké (podobné).

- oprava o chod gravimetra



príklad použitia polynómu 4. stupňa (program Drift)

- oprava o chod gravimetra



príklady použitia splajnových funkcií (program DbGrav)

Gravimetria – poznámky ku prvotnému spracovaniu

Stredná chyba meraného tiažového zrýchlenia (m_g):

Je určovaná z meraní na kontrolných bodoch (KB), t.j. bodov meraných počas rozdielnych meračských dní alebo s rozdielnymi prístrojmi:

$$m_g = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [v \cdot v]}{n - p}}$$

kde:

n – počet všetkých meraní na kontrolných bodoch,

p – počet kontrolných bodov

$[v \cdot v]$ – kvadrát odchýlky daného merania na KB

od aritmetického priemeru (z viacerých meraní na KB)

Počet KB by mal tvoriť pri regionálnej gravimetrii 5-10% z celkového počtu všetkých bodov, pri mikrogravimetrii 10-20 %.

Tieto chyby sú akceptovateľné pri regionálnej gravimetrii okolo ± 30 až $\pm 80 \mu\text{Gal}$, pri mikrogravimetrii pod $\pm 20 \mu\text{Gal}$ (lepšie pod $\pm 10 \mu\text{Gal}$).

Gravimetria – poznámky ku meraniu

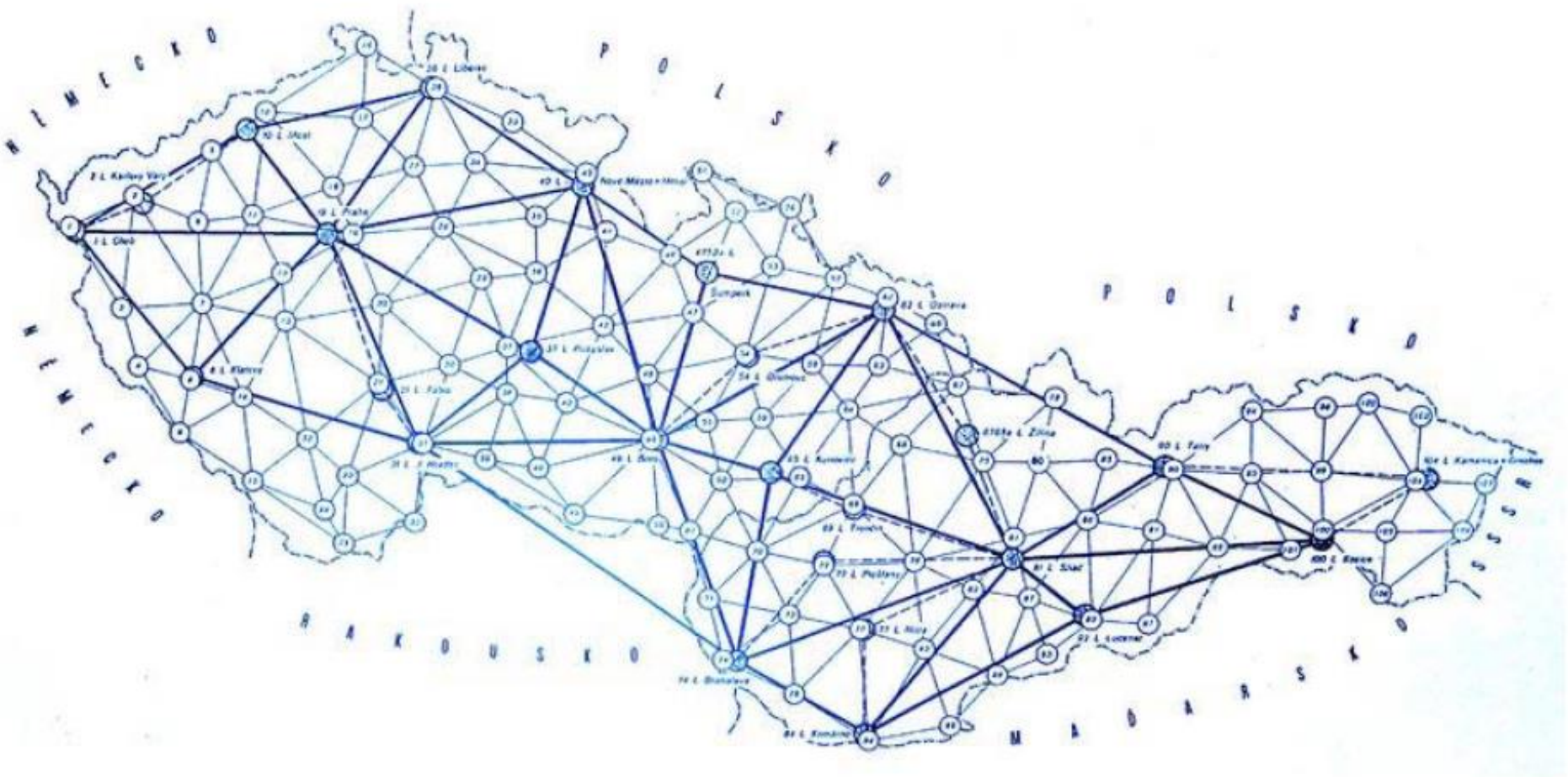
ťažové systémy (ťažového zrýchlenia)

všetky relatívne gravimetrické údaje musia byť naviazané na absolútne merania a tie nie sú vždy rovnaké (žiaľ) - podľa toho, z akých meraní (podľa použitých prístrojov) a koncepcií vychádzajú, hovoríme o tzv. ťažových systémoch

ťažové systémy

- prvý používaný (jednotný) systém tiaže bol **Viedenský systém**
- najznámejší systém bol tzv. **Potsdamský systém**
- dodnes používaný systém tiaže je **IGSN71**, ktorý je rozdielny oproti systému Potsdam o hodnotu $(-14 + \varepsilon)$ mGal, kde ε je hodnota, ktorá závisí od regiónu a bola určená absolútnymi meraniami (pre naše územie $+0.2$ mGal); tento rozdiel bol spôsobený chybou v spracovaní absolútnych meraní v 1930ich rokoch v Potsdame, ktorý bol jedným z prvých miest na svete, kde sa absol. merania realizovali (odvtedy je akýmsi štandardom týchto meraní)
celkovo v sebe zahrňuje 1873 bodov po celom svete
- dnes sa v mnohých krajinách (aj u nás) používajú nové (lokálne) systémy, naviazané na merania s absolútnymi gravimetrami firmy Micro-g (FG-5, A-10)

ťažové systémy



Československá gravimetrická sieť zameraná v rokoch 1948-1954.

ťažové systémy

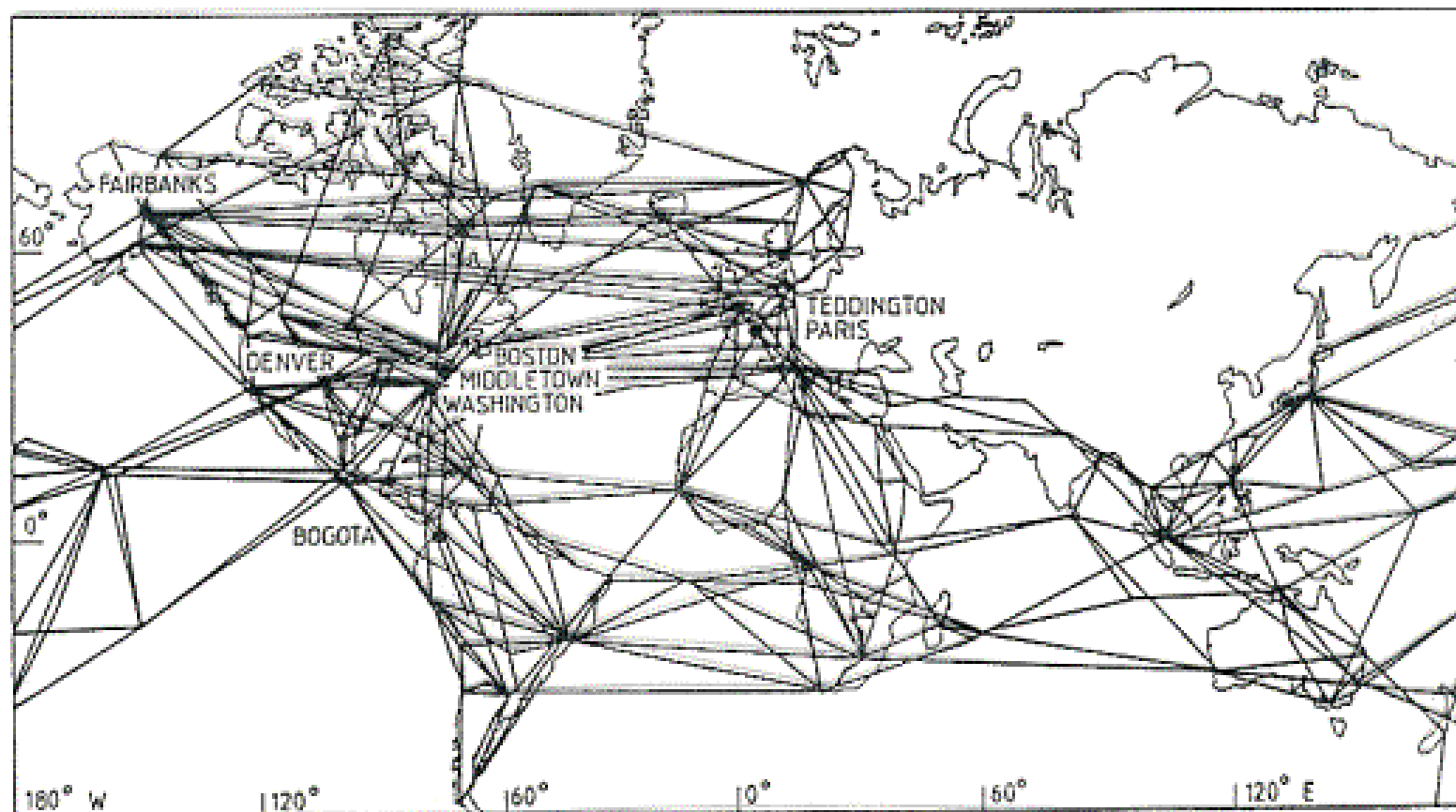


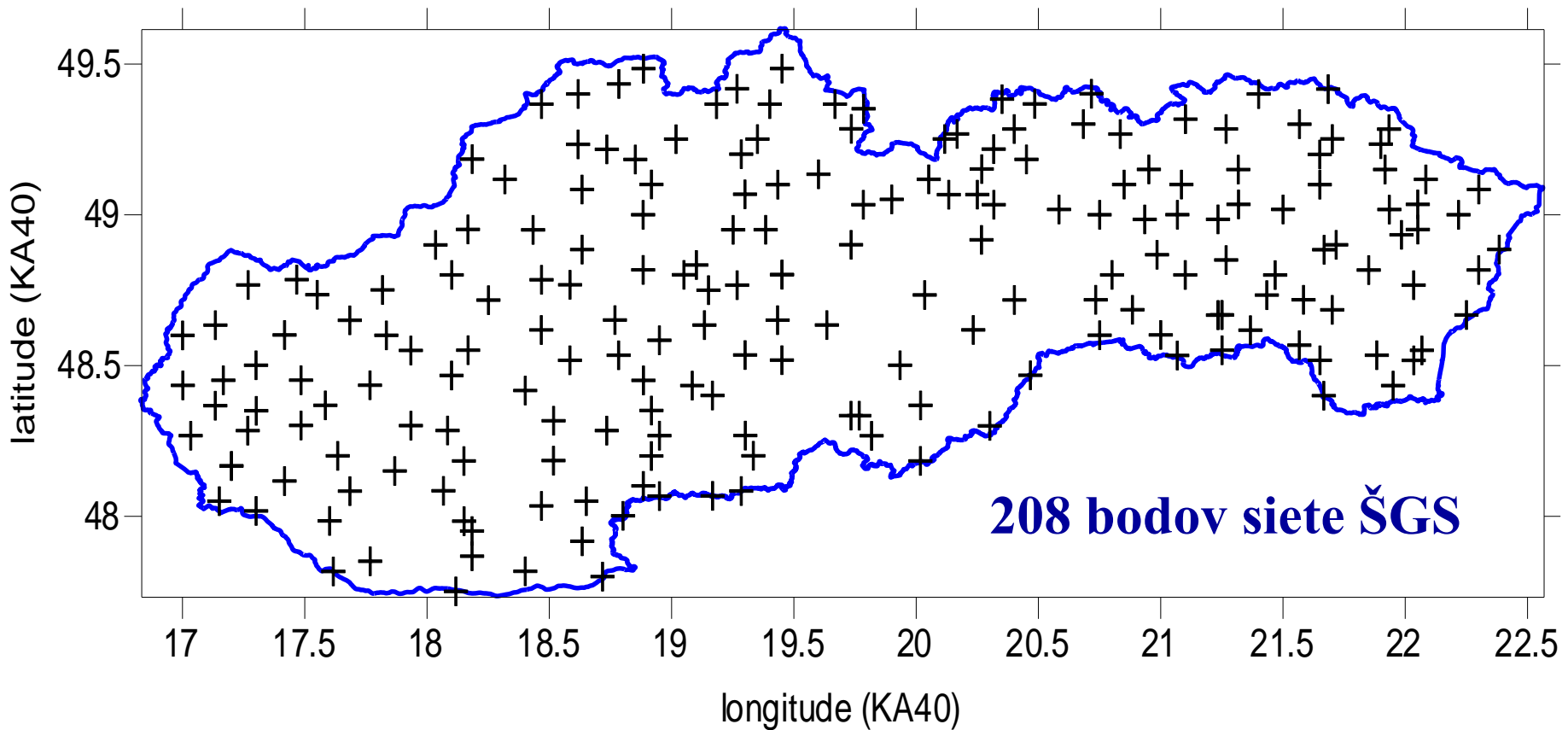
Fig. 9.1: International Gravity Standardization Net 1971 (I.G.S.N.71): Absolute gravity stations and selected network ties, after MORELLI et al. (1974)

štátne siete –

Štátna Gravimetrická Sieť (ŠGS) Slovenskej Republiky

208 bodov, tzv. systém 1995 (založený na meraniach s FG-5)
správca: Geodetický a kartografický ústav Bratislava (GKÚ)

novšia koncepcia – geodetické body: sieť ŠPS
(zamerané s GPS, nivelované, zatiaľ vo výstavbe)



- všetky detailné a regionálne merania musia byť (podľa normy) naviazané na body Štátnej Gravimetrickej Siete (ŠGS) alebo Štátnej Priestorovej siete (ŠPS)
- výnimkou sú podrobné a mikrogravimetrické merania na inžinierske, environmentálne a archeologické účely, ktoré nemusia byť napojené na bod so známou hodnotou tiažového zrýchlenia (postačujú relatívne hodnoty)

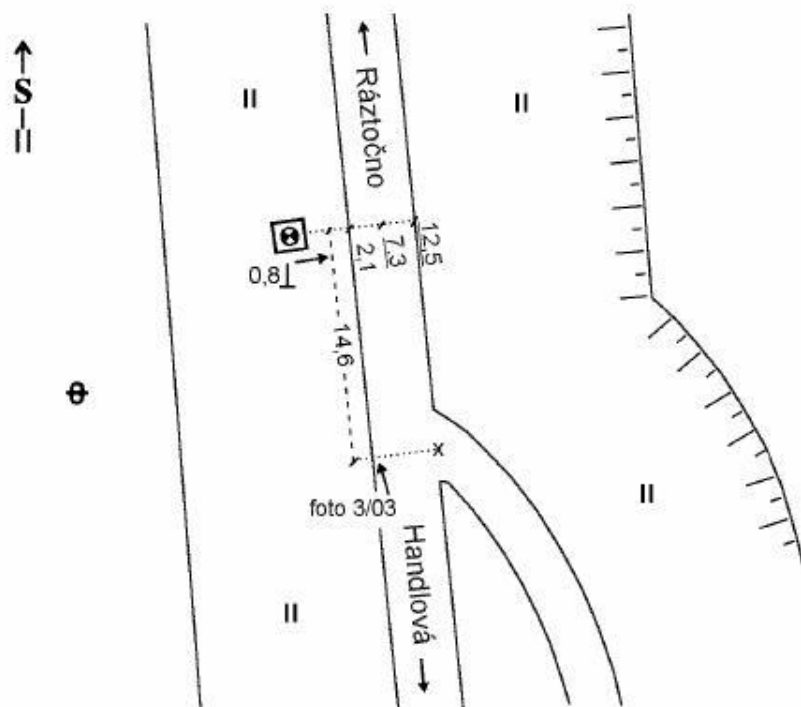


príklad bodu ŠGS

- všetky detailné a regionálne merania musia byť (podľa normy) naviazané na body Štátnej Gravimetrickej Siete (ŠGS) alebo Štátnej Priestorovej siete (ŠPS)



príklad bodu ŠGS



plus v katalógu sa nachádzajú hodnoty zemepisných súradníc, nadmorskej výšky a tiažového zrýchlenia

príklad popisu bodu ŠPS



príklad vzhľadu bodu ŠPS